

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕВОГО ГРАФИКА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ РЕСУРСОВ

<sup>1</sup>Горбанева Е. П., <sup>1</sup>Овчинникова Е. В., <sup>1</sup>Севрюкова К. С.

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

e-mail: egorbaneva@vgasy.vrn.ru, eovchinnikova0803@gmail.com,  
ksevrukova@vgasy.vrn.ru

**Аннотация.** Жизненный цикл жилого дома разделяется на несколько фаз: фаза создания, фаза эксплуатации, фаза ликвидации. В управлении жизненным циклом жилого дома основной задачей является увеличение продолжительности стадии эксплуатации и предотвращение преждевременного его износа. Для обеспечения увеличения фазы эксплуатации основных фондов жилищной сферы необходимо их непрерывное возобновление (проведение ремонтно-строительных работ). Рациональное проведение ремонтных работ зависит от принятой системы их организации. Сетевое планирование предусматривает определенную очередность производства ремонтных работ. Расчет критического пути и резервов времени продолжительности выполнения работ в сетевом графике является важной составляющей. После расчета и анализа критического пути производят корректировку сетевого графика. В зависимости от поставленной задачи производят частную или комплексную оптимизацию. В статье рассмотрены методы оптимизации по критериям: «время», «время-трудовые ресурсы» и «время-затраты».

**Ключевые слова:** метод оптимизации, сетевой график, сетевое планирование, критический путь.

### OPTIMIZATION OF THE NETWORK SCHEDULE IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES

E. P. Gorbaneva<sup>1</sup>, E. V. Ovchinnikova<sup>1</sup>, K. S. Sevryukova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

e-mail: egorbaneva@vgasy.vrn.ru, eovchinnikova0803@gmail.com,  
ksevrukova@vgasy.vrn.ru

**Abstract.** The life cycle of a house is dividing into several phases: the phase of creation, the phase of exploitation, the phase of liquidation. In managing the life cycle of a residential building, the main task is to increase the duration of the operation stage and prevent premature wear. To ensure an increase in the phase of operation of the fixed assets of the housing sector, their continuous renewal (repair and construction works) is necessary. Rational repair work depends on the adopted system of their organization. Network planning provides for a certain sequence of repair work. Calculating the critical path and time reserves of the duration of work in the network schedule is an important component. After calculating and analyzing the critical path, the network schedule adjusted. Depending on the task, partial or complex optimization performed. The article describes the optimization methods according to the criteria: «time», «time- labor resources» and «time-cost».

**Keywords:** optimization method, network scheduling, network planning, critical path.

## 1. Введение

Активное развитие сетевого планирования и управления началось в 50-х годах XX века. Если сравнивать с традиционными методами планирования (линейными графиками), то сетевые модели имеют ряд преимуществ такие как: наиболее полная взаимосвязь между работами; возможность установить ранние и поздние сроки выполнения работ; возможность оптимизации по времени, ресурсам (трудовые, материальные); максимальное сокращение рисков, контроль за ходом выполнения работ и т.д.

Сетевая модель состоит из элементов: работа (или задача), событие, связь. В свою очередь, работа делится на: действительную работу, ожидание, «фиктивную» работу.

Для сетевой модели определяются следующие характеристики элементов:

- характеристики событий: ранний срок свершения событий, поздний срок свершения событий, резерв времени событий;
- характеристики работы: ранний срок начала работы, ранний срок окончания работы, поздний срок начала работы, поздний срок окончания работы;
- резервы времени работ: полный резерв, частный резерв, свободный резерв, независимый резерв;
- характеристики путей: продолжительность пути равна сумме продолжительностей составляющих ее работ; резерв времени пути равен разности между длинами критического пути и рассматриваемого пути [1, 2, 3].

Классифицировать сетевые графики можно по нескольким критериям представленных на рис. 1.

Расчет сетевого графика заключается в нахождении оптимального критического пути и определение резервов времени для работ, лежащие на этом пути.

В основе метода критического пути лежит математический алгоритм. Создается модель проекта, включающая в себя: перечень работ; зависимость между работами; длительность выполнения работ. Метод критического пути позволяет вычислить как ранние, так и поздние даты начала и окончания работ без учета ограничений на ресурсы [4].



Рис. 1. Классификация сетевых графиков

Оптимизацию сетевого графика производят после нахождения критического пути, резервов времени работ и оценки выполнения проекта в заданный срок. Методы оптимизации сетевого графика показаны на рис. 2.



Рис. 2. Методы оптимизации сетевого графика

Оптимизацию сетевого графика можно условно разделить на частную и комплексную. К частной оптимизации можно отнести минимизацию времени выполнения комплекса работ при заданной его стоимости и минимизацию стоимости комплекса работ при заданном времени выполнения проекта. К комплексной оптимизации относится нахождение оптимального соотношения величин стоимости и сроков выполнения проекта в зависимости от заданных целей, ставящихся при его реализации [1,5-7]. Далее рассмотрим более подробно методы оптимизации сетевого графика по критериям: «время», «время-трудовые ресурсы», «время-затраты».

## 2. Оптимизация сетевого графика по критерию «время»

Первоначальный вариант рассчитанного критического пути  $t_{кр}$  сетевого графика может быть меньше или больше планируемого срока  $t_{пл}$ . Если  $t_{кр} < t_{пл}$ , то возникает дополнительный резерв времени  $R_{доп} = t_{пл} - t_{кр}$ . Дополнительный резерв ведет к увеличению продолжительности отдельных работ  $t_{(i-j)}$ , лежащих на критическом пути, при последующей его оптимизации. Если же  $t_{кр} > t_{пл}$ , то возникает отрицательный резерв времени. Отсюда следует, что позднее окончание работ, входящих в завершающее событие, принимает значение  $t_{пл}$ . После анализа рассчитанного первоначального критического пути и резерва времени производим уплотнение (корректировку) сетевого графика. Уплотнение графика происходит за счет многократного сжатия критического пути.

В соответствии заданным срокам существует несколько способов оптимизации сетевого графика:

- за счет замены нормальной продолжительности выполнения работ, лежащих на критическом пути, сокращенной;
- за счет привлечения дополнительной численности исполнителей (при наличии дополнительного ресурса и если позволяет фронт работ);
- установка и проверка правильности временных оценок выполнения работ в соответствии с нормами по выполнению подобного вида работ;
- анализ возможности выполнения критических работ за счет использования ресурсов не критической зоны;

- анализ возможности расчленения отдельных работ и последующего их параллельного выполнения;
- анализ сетевого графика с целью сокращения продолжительности выполнения всех имеющихся работ.

Наиболее распространенным способом оптимизации является за счет изменения выполнения работ критической зоны. Рекомендуются сокращать выполнение работ, лежащих на подкритических путях. В результате сокращения выполнения работ могут возникнуть новые критические пути. За счет переброски ресурсов с ненапряженных работ в первую очередь происходит уменьшение временных оценок по критическим работам. Однако нужно учитывать имеющиеся резервы. Так как в результате переброски возникает большая вероятность, что ненапряженные участки работ могут стать критическими. В случае нехватки внутренних ресурсов, возникает необходимость привлечения дополнительных ресурсов со стороны [1,7-11].

Переброска ресурсов приводит к образованию нового сетевого графика. Отсюда следует, что возникает необходимость проверки всех расчетных параметров при сохранении той же топологии.

В стохастических сетевых графиках временные оценки изменяются в первую очередь за счет пересмотра всех трех оценок времени ( $t_{\min}, t_{н.в}, t_{\max}$ ) по критическим работам.

Н. В. Катаргин в своей работе [12] разработал методику оптимизации сетевого графика при стохастическом характере длительности отдельных работ, основанную на методе Монте-Карло. Автор ввел понятие как «опорное событие», которое позволило минимизировать число ограничений. С помощью сервиса Excel «Поиск решения» была проведена оптимизация сетевого графика выполнения комплекса работ. Метод Монте-Карло позволил оценить вероятность сроков окончания проекта при любом законе распределения длительности работ. Метод Монте-Карло применяется для моделирования случайных процессов со значительной неоправданностью в исходных данных с помощью генератора случайных величин [13, 14].

Для изменения временных оценок вполне достаточно изменить только часть критических работ. Если не удастся сократить срок выполнения работ после изменения временных оценок, то прибегают к более кардинальному решению, такому как к изменению топологии сетевого графика. Например, если работы изначально планировались проводиться последовательно, то при изменении топологии работы будут проводиться параллельно. Такое изменение выполнения работ возможно приведет к сокращению длительности критического пути. Параллельное выполнение работ дает возможность последующую работу начать еще до полного окончания предшествующей [3, 11].

При корректировке сетевого графика по критерию «время» необходимо постоянно проверять и сравнивать длительность остальных путей сетевого графика, так как в связи с сокращением критического пути уменьшаются резервы времени, что ведет к возникновению новым критическим работам. Если после всех принятых мер по сокращению продолжительности выполнения всего комплекса работ установленный срок, не достигнут, ставится вопрос об изменении этого срока [5, 7, 11].

### 3. Оптимизация сетевого графика по критерию «время- трудовые ресурсы»

Оптимизация по критерию «время-трудовые ресурсы» позволяет более точно распределить трудовые ресурсы по календарным периодам времени. Для каждой специальности отдельно распределяется численность исполнителей для всех календарных периодов и ведется расчет их потребности  $\sum_1^e Ч_e$  (где  $e$  – количество работ, потребляющий данный ресурс и попадающий в данный период времени).

#### Определение уровня потребности ресурсов

1. Сетевой график строится по шкале времени. Работы отображаются сплошными стрелками в масштабе времени их свершения по наиболее ранними или поздним срокам свершения  $(t_{(i-j)}^{p.n}; t_{(i-j)}^{p.o}; t_{(i-j)}^{n.n}; t_{(i-j)}^{n.o})$ , а резервы времени работ второго  $(r_{i=j}'')$  или первого  $(r_{i=j}')$  вида отображаются волнистыми линиями;

2. Определяется суммарная потребность в трудовых ресурсах  $\sum_1^e Ч_k$ . По каждой специальности  $(1 \dots k)$  по периодам времени отдельно суммируются число исполнителей в графах по ранним или поздним срокам [8, 11].

Оптимизацию по критерию «время-трудовые ресурсы» следует применять при соблюдении определенных условий: специалисты, выполняющие параллельные работы, должны быть взаимозаменяемые; группы специалистов должны быть подчинены одному руководителю. В случае несоблюдения условий организация работ и сокращение сроков выполнения могут потребоваться дополнительные ресурсы (работников и средств) на работы критического пути [15].

Оптимизация по критерию “трудовые ресурсы” ведет к увеличению продолжительности выполнения отдельных работ в пределах резервов времени. Увеличение продолжительности работ до некоторых пределов уменьшает затраты на их выполнение. Возникает возможность при найденном критическом пути  $t_{кр}$  использовать резервы времени не критических работ  $(r_{i=j}'')$  и  $(r_{i=j}')$  и получить сетевой график с минимальными денежными затратами на весь комплекс работ. Так же возможно за счет увеличения затрат на работы критического пути сократить выполнения этого пути, тем самым сократить и сроки выполнения всего комплекса работ [16].

При оптимизации сетевого графика учитывается не только сроки выполнения работ и численность исполнителей, но и стоимость работ. При определении стоимости работ учитывается все используемые работы [7].

### 4. Оптимизация сетевого графика по критерию «время- затраты»

Метод оптимизации «время-затраты» заключается в установлении зависимости между производительностью  $t_{(i-j)}$  и стоимостью  $C_{(i-j)}$  работ с целью их оптимизации.

Материальные и трудовые ресурсы планируются на основе общей структуры сетевого графика, созданной по системе планирования временных оценок. В результате изменения временных оценок могут быть изменены и выделенные на эти работы ресурсы.

Для построения графика «время-затраты» необходимо задать для каждой работы минимально возможную величину затрат  $C_{(i-j)}^{min}$  на выполнение  $(i-j)$  работы и минимально возможное время выполнения работы  $t_{(i-j)}^{min}$ . Во-первых, необходимо, определить пару оценок, которые рассчитывают максимальное сокращение затрат, далее определяется вторая пара оценок, рассчитанная на максимальное сокращение времени.

Для нахождения искомой величины затрат  $C_{(i-j)}^и$  проводят на графике аппроксимирующую кривую, соединяющую найденные каждые пары оценок. Аппроксимирующая кривая позволяет определить размеры увеличения расходов при необходимости сокращения срока выполнения работы или увеличение времени выполнения работы при уменьшении затрат. На рис. 3. показан график «время-затраты».

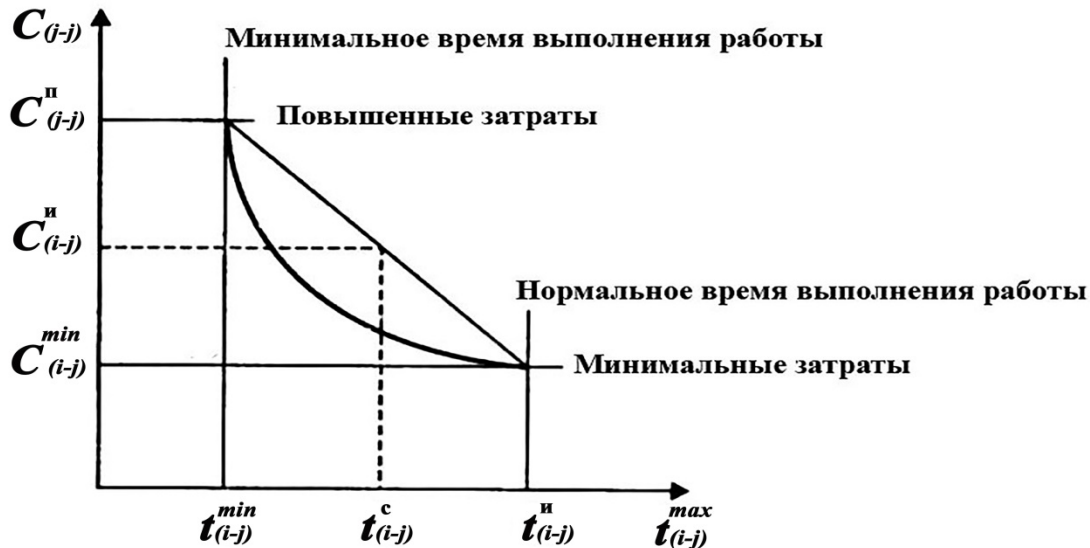


Рис. 3. Оптимизация сетевого графика по критерию «время – затраты»

Искомая величина затрат, необходимая для выполнения работы в сокращенное время, будет равна:

$$C_{(i-j)}^и = \frac{(C_{(i-j)}^п - C_{(i-j)}^min)(t_{(i-j)}^н - t_{(i-j)}^с)}{t_{(i-j)}^н - t_{(i-j)}^max}, \quad (1)$$

где  $C_{(i-j)}^и$  – искомая величина затрат, необходимая для выполнения  $(i-j)$  работ в сокращенное время  $t_{(i-j)}^с$ ;  $C_{(i-j)}^п$  – повышенные размеры денежных затрат;  $C_{(i-j)}^min$  – минимально возможная величина затрат на выполнение  $(i-j)$  работ;  $t_{(i-j)}^н$  – нормальное время при которой может быть выполнена минимально возможная затрата  $C_{(i-j)}^min$ ;  $t_{(i-j)}^max$  – максимальное значение, за пределами которой не могут выполняться работы;  $t_{(i-j)}^с$  – сокращенное время работ.

Коэффициент возрастания затрат вычисляется согласно линейному закону увеличения затрат при сокращении времени для каждого вида работ.

$$S_{(i-j)}^з = \frac{(C_{(i-j)}^п - C_{(i-j)}^min)}{t_{(i-j)}^н - t_{(i-j)}^min} \text{ руб. / ед. времени.} \quad (2)$$

где  $S_{(i-j)}^з$  – коэффициент возрастания затрат;  $t_{(i-j)}^min$  – минимальное время выполнения работ.

Экономию для каждой работы рассчитывают, взяв произведение  $S_{(i-j)}^з$  и приращение длительности работы, за счет частного резерва времени. Полная экономия будет равно сумме средств, сэкономленных на каждой работе. Полная стоимость будет равна разности между первоначальной стоимостью и суммарной экономией, которая получилась в результате оптимизации [7, 8, 11].

Если увеличить продолжительность выполнения работ, лежащие на некритических путях в пределах имеющихся частных резервов времени, то в результате снизятся затраты в целом при сохранении продолжительности критического пути. При аннулировании всех частных резервов времени, возникнут новые критические пути. Поэтому сокращение частных резервов времени необходимо применять с осторожностью.

Сокращение работ с учетом изменения выделяемых для них ресурсов и увеличение затрат применим только к простым сетевым графикам. Для более сложных необходимо применять численные методы оптимизации, такие как алгоритм Келли [16], алгоритм Гомори, метод ветвей и границ, муравьиный алгоритм и т.д. Сущность метода Гомори заключается в построении ограничений. После конечного числа итераций находится оптимальное решение или появляется возможность убедиться в том, что задача не имеет решений [17, 18]. Суть метода ветвей и границ заключается в последовательном разбиении множества допустимых решений на два не пересекаемых подмножества и отбрасыванию заведомо бесперспективных вариантов [18–22]. Муравьиный алгоритм основан на моделировании поведения муравьев. Муравьиный алгоритм применяется для составления календарного плана выполнения строительных работ при ограничениях по ресурсам (время, время-затраты). Применение этого метода позволяет значительно уменьшить общий цикл выполнения работ [22–24].

## 5. Заключение

При проведении ремонтно-строительных работ любая строительная организация обычно располагает не только ограниченными ресурсами (материальными, трудовыми), но ограничениями по времени проведения выполнения работ. Ввиду этого после приведения сетевого графика к заданному сроку необходимо проанализировать обладает ли строительная организация достаточным количеством ресурсов для выполнения ремонтно-строительных работ согласно предусмотренному сетевому графику и произвести оптимизацию по сокращению продолжительности работ, находящихся на критическом пути.

Из вышеперечисленных методов оптимизации сетевых графиков можно выделить меры, необходимые для сокращения продолжительности работ, находящихся на критическом пути, такие как: перераспределение всех имеющихся ресурсов; сокращение трудоемкости критических работ за счет их переброски на некритические пути, имеющихся резервов времени; параллельное выполнение работ; изменение состава и структуры работ. Также для сокращения срока выполнения ремонтно-строительных работ возможно применить такие меры как: привлечение дополнительных трудовых ресурсов на выполнение критических работ; совмещение технологических процессов во времени; разбивка здания на большое количество участков и т.д.

## Список литературы

1. Кирнев А.Д. Организация строительного производства. Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пособие/ Кирнев А.Д. - Ростов н/Д.: Фенекс, 2006. -672 с.
2. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П., Арчакова С.Ю., Добросоцких М.Г. Моделирование выполнения бригадами комплекса технологических процессов в организационно-технологическом проектировании / ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. Серия «Инновационная экономика: человеческое измерение»: научно-практический и методологический журнал. – Воронеж, 2017. – №6. – С. 37-43.

3. Сироткин Н.А., Организация и планирование строительного производства: учеб. пособие / Сироткин Н.А., Ольховиков С.Э. - М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. - 212 с.
4. Овчинникова Е.В., Ритхи Йюн, Севрюкова К.С., Добросоцких М.Г. Преимущества применения сетевого планирования при ремонтно-строительных работах / Современные тенденции строительства и эксплуатации объектов недвижимости: сб. науч. ст.- Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2017. - С.127-133.
5. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П. Оптимизация распределения ресурсов в задачах по созданию и содержанию объектов недвижимости / Актуальные проблемы строительства и недвижимости: межвуз.сб.науч.тр.- Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2004.- С.81-86.
6. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П., Мануковский А. Ю., Сафонов А.О. Генетические алгоритмы в решении многокритериальных задач оптимизации распределения ресурсов при планировании энергосберегающих мероприятий / Науч.вестн. ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2014. -№3(35).-С.77-82.
7. Горбанева Е.П., Семененко Т.О., Добросоцких М.Г. Построение математической модели оптимизации численности рабочих в строительной бригаде на примере проведения капитального ремонта в г. Воронеже / Строительство и недвижимость. - 2018.- №1(2).- С.150-154.
8. Приведение параметров сетевого графика с соответствии с заданными ограничениями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://poisk-ru.ru/s18493t2.html> (дата обращения 01.09.2018)
9. Горбанева Е.П., Колесник С.А, Тюрина П.А. Формирование эффективного портфеля инвестиционно-строительных проектов / Современные проблемы и перспективы развития строительства, эксплуатации объектов недвижимости. – Воронеж, 2016. – С.171-177.
10. Каренов К.М. Теоретические и методические основы оптимизации сетевых моделей по времени. Основные сведения о системах сетевого планирования и управления/ К.М. Каренов//Вестник КарГУ. - 2012.
11. Разу М.А. Управление проектом. Основы проектного управления: учеб. / М.А. Разу. - М.: КНОРУС, 2006. – 768 с.
12. Катаргин Н.В. Оптимизация сетевого графика выполнения комплекса работ / Менеджмент. Управленческие науки. -2012. - № 1.- С.87-93.
13. Karabulut M. Application of Monte Carlo simulation and PERT/CPM techniques in planning of construction projects: A Case Study/ M. Karabulut//Periodicals of Engineering and Natural Sciences.- Dec. 2017.- vol.5, №3.- P. 408-420.
14. Doubravsky K. Comparison of approaches for calculationg the probabily of a project completion/ K. Doubravsky, R. Doskocil// Journal of Eastern Europe Research in Business &Economics.- 2015.
15. Prasanna Kumar D. Evaluation of human resources management in construction industry using analytical apporoach: a model study/ D. Prasanna Kumar, A. Satish, SS. Asadi// International Journal of Mechanical Engineering and Technology.- 2018.- vol. 9, is. 2.- P. 95-104.
16. Горбанева Е.П., В.В. Шейкина Анализ и методы определения рисков проекта инвестиционно-строительной деятельности / Современные тенденции строительства и эксплуатации объектов недвижимости: сб. науч. ст.- Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2017. - С.223-229.
17. Аксенов, Е.П. Методы оптимальных решений : учеб. пособие/ Е.П. Аксенов. - Пермь: ИПЦ “Прокрость”, 2016. – 90 с.
18. Тюхтина А.А. Методы дискретной оптимизации: Часть 1 : учеб. метод. пособие/ А.А. Тюхтина. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. 2014.- 62 с.
19. Алексеева Е.В. Численные методы оптимизации : учеб. пособие /Е.В. Алексеева, О.А. Кутненко, А.В. Плясунов. - Новосибирск: Изд-во Новосибирский ун-т, 2008. - 128 с.
20. Сигал И.Х Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы : учеб. пособие. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 240 с.
21. Горбанева Е.П., Овчинникова Е.В., Берет Е.Ж. Обзор программного обеспечения для организации календарного планирования / Строительство и недвижимость. - 2018.- №1(2).- С.139-142.
22. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы: учеб. пособие. / А.А. Лазарев, Е. Р. Гафаров. - Москва. -2011.-222с.



23. Горбанева Е.П., Бабешко Е.А. Проблемы организации строительного производства энергоэффективных объектов недвижимости / Современные тенденции строительства и эксплуатации объектов недвижимости: сб научн. ст. по материалам научно-практической конференции; ВГТУ – Воронеж, 2017. – С.164-169.
24. Vishnu, Vijayan Time-cost-risk optimization in construction work by using ant colony algorithm/ Vijayan Vishnu, V. Achu, MS Riyana, R. Jayakrishnan// International Research Journal of engineering and Technology.- Apr-2018.- vol. 05, is. 04. - P. 2298- 2306.